

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:
SIMULACIÓN DE LA TÉCNICA SIC (CANCELACIÓN DE INTERFERENCIA
SUCESIVA) PARA MIMO MASIVO EN MATLAB**

**AUTORES:
LUIS ANTONIO BAQUERO FREIRE
JONATHAN FREDERIC CHUNGANDRO CUICHAN**

**TUTORA:
VERÓNICA EMMA SORIA MALDONADO**

Quito, julio del 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Luis Antonio Baquero Freire y Jonathan Frederic Chungandro Cuichan, con documentos de identificación N° 1720292372 y 1723189443 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación, intitulado: “SIMULACIÓN DE LA TÉCNICA SIC (CANCELACIÓN DE INTERFERENCIA SUCESIVA) PARA MIMO MASIVO EN MATLAB”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Electrónicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Nombre: Luis Antonio Baquero Freire

Cédula: 1720292372



Nombre: Jonathan Frederic Chungandro
Cuichan


Cédula: 1723189443

Quito, julio de 2019

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, “SIMULACIÓN DE LA TÉCNICA SIC (CANCELACIÓN DE INTERFERENCIA SUCESIVA) PARA MIMO MASIVO EN MATLAB”, realizado por Luis Antonio Baquero Freire y Jonathan Frederic Chungandro Cuichan, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, julio de 2019



Verónica Emma Soria Maldonado

C.I: 1715185961

SIMULACIÓN DE LA TÉCNICA SIC (CANCELACIÓN DE INTERFERENCIA SUCESIVA) PARA MIMO MASIVO EN MATLAB.

Luis Antonio Baquero Freire¹, Jonathan Frederic Chungandro Cuichan², Verónica Emma Soria Maldonado³

Resumen

En la actualidad es una necesidad la transmisión y recepción de datos a grandes velocidades en sistemas inalámbricos como 5G, para lo cual se pretende utilizar MIMO Masivo que con la aplicación de detectores eficientes en el receptor podría cumplir con esta meta. En este artículo se compara el rendimiento de los diferentes algoritmos de detección como son, Zero Forcing (ZF), Minimum Mean Square Error (MMSE) y sus versiones con Cancelación de interferencia sucesiva (SIC) como, Zero Forcing-SIC (ZF-SIC), Minimum Mean Square Error-SIC (MMSE-SIC), en diferentes modulaciones (BPSK, 16QAM, 64QAM). Se obtiene como resultado que los detectores ZF-SIC, MMSE-SIC presentan un mejor rendimiento que sus versiones estándar, ZF y MMSE.

Palabras Clave: ZF, ZF-SIC, MMSE, MMSE-SIC, MIMO Masivo.

Abstract

Nowadays it is a necessity to transmit and receive data at high speeds in wireless systems such as 5G, then it is intended to use Massive MIMO with the application of efficient detectors in the receiver could meet this goal. This article compares the performance of the different detection algorithms such as, Zero Forcing (ZF), Minimum Mean Square Error (MMSE) and their versions with successive interference cancellation (SIC) as, Zero Forcing-SIC (ZF-SIC), Minimum Mean Square Error-SIC (MMSE-SIC), in different modulations (BPSK, 16QAM, 64QAM). The result is that the ZF-SIC, MMSE-SIC detectors have a better performance than their standard versions, ZF and MMSE

Keywords: ZF, ZF-SIC, MMSE, MMSE-SIC, MIMO Massive.

¹ Estudiante de Ingeniería Electrónica – Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador
Correo electrónico: lbaquero@est.ups.edu.ec

² Estudiante de Ingeniería Electrónica – Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador
Correo electrónico: jchungandro@est.ups.edu.ec

³ Docente, esta con el grupo de investigación GIETEC de la Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador
Correo electrónico: vsoria@ups.edu.ec

1. Introducción

El sistema MIMO Masivo, consiste en el aumento del número de antenas en transmisión y recepción de las comunicaciones, esto con el objetivo de obtener una mayor ganancia por diversidad espacial que aumente la capacidad del canal obteniendo una mejor directividad, también se tiene eficiencia energética debido a la concentración de potencia en determinadas áreas. [1]- [2]

Uno de los problemas a los que se enfrentan los sistemas de comunicaciones MIMO Masivo es encontrar un detector con el cual se obtenga una probabilidad de error similar a la obtenida con un detector óptimo. Esto es importante en redes 5G para garantizar la reconstrucción de la señal, evitar la pérdida de información e introducción de ruido en la misma. [3]- [4]

Los detectores como ZF (Zero Forcing) y MMSE (Minimum Mean Square Error), son simples de implementar, pero ofrecen soluciones por debajo de la óptima. En 1999 se ofreció una mejora de dichos detectores conocida como SIC (Cancelación Sucesiva de Interferencias), que consiste en la decodificación de forma secuencial con ordenamiento óptimo. Esto dio lugar a los algoritmos de detección ZF-SIC y MMSE-SIC que ofrecen una probabilidad de error menor que sus versiones estándar. [3]

El método SIC (Cancelación de interferencia sucesiva), encuentra la secuencia de señales transmitidas, ya que tiene un conjunto de receptores lineales, que detecta cada una de estas señales para que en cada estado del arreglo el dato detectado sea restado de la secuencia recibida para reducir la interferencia en cada etapa, así establece cual es el mejor símbolo enviado y cuál es el mejor canal en transmisión. En SIC, para tener un buen rendimiento del sistema se debe tomar en cuenta el orden en la detección.[3]- [5]

El algoritmo ZF-SIC (Zero Forcing SIC), determina cuál de las señales transmitidas tiene mayor intensidad, cancelando las señales con menor potencia, para encontrar el flujo de transmisión que posea una mínima diferencia de error. Por último, de la señal recibida se toma los

bits que poseen los datos transmitidos y se los elimina del vector para repetir el proceso. [5]

Para el algoritmo MMSE-SIC (Minimum Mean Square Error - SIC) se debe interactuar con las matrices generadas, y desde una apreciación detectar los símbolos de estimación, en caso de tener más de estos se los debe buscar en las matrices generadas. [5]

En este artículo académico se comparará el rendimiento de los detectores ZF (Zero Forcing) y MMSE (Minimum Mean Square Error) con los detectores ZF-SIC (Zero forcing SIC) y MMSE-SIC (Minimum Mean Square Error SIC) para el sistema MIMO Masivo que se utilizan en su mayoría para Downlink.

En el apartado número dos y tres del artículo se tiene los conceptos básicos del sistema a emplear, así como los modelos matemáticos de los detectores a usar.

El apartado número cuatro describe la simulación y variables a utilizar.

Para el apartado número cinco se tienen los resultados obtenidos en la simulación para su posterior análisis.

Para culminar, en el apartado 6 se muestra las conclusiones logradas en el artículo académico.

2. MIMO Masivo

Es un sistema que opera en un contexto de MIMO multi usuario (MU-MIMO, Multi-user MIMO), el cual cuenta con un canal de difusión (BC, Broadcast Channel) para downlink y uplink respectivamente, y canal de acceso múltiple (MAC, Multiple Access Channel) [6].

MIMO Masivo no es una tecnología nueva, sino una evolución natural de la tecnología MIMO, la cual está implantada en muchas aplicaciones como en los últimos estándares 802.11 y en redes LTE. [1]

En MIMO Masivo los detectores SIC (Cancelación de Interferencia Sucesiva) cumplen un papel muy importante, ya que al tener muchas antenas en transmisión ayudan a la detección de las señales en recepción y así tener un buen rendimiento general del sistema. [7]

3. SIC (Cancelación de Interferencia Sucesiva)

El método SIC efectúa la cancelación de las señales paralelas percibidas desde la señal recibida, debido a que posee un conjunto de receptores lineales que realiza la detección de los flujos de datos recibidos. [5]

3.1 ZF-SIC (Zero Forcing - SIC)

Receptor forzado a cero, es un receptor MIMO lineal simple, con baja complejidad computacional. Minimiza la interferencia, pero experimenta el acrecentamiento del ruido. El receptor ZF funciona mejor con un nivel alto de SNR. El método de forzado a cero se basa en el cálculo de la Pseudoinversa de la matriz de canal H . El vector recibido se da en la ecuación 1 y se puede representar en notación matricial de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

o equivalente,

$$y = Hx + n \quad (2)$$

Donde y = símbolos recibidos,

x = símbolos transmitidos,

n = ruido en las antenas receptoras.

Para resolver x , se debe obtener la matriz W , para satisfacer la ecuación $WH = I$. El detector de forzado a cero (ZF) para cumplir con esta restricción viene dado por.

$$W = (H^H H)^{-1} H^H \quad (3)$$

Donde W - Matriz de ecualización y

H - Matriz de canales

El algoritmo de decodificación consta de tres partes recursivas:

1. Ordenamiento: para determinar la mínima varianza de error del conjunto de símbolos transmitidos.
2. Estimación: en transmisión se detecta la señal más potente y se elimina las débiles.
3. Cancelación: se toma los datos válidos y se elimina del arreglo obtenido en recepción para regresar al paso uno.[7]

3.2 MMSE-SIC (Minimum Mean Square Error - SIC)

Un estimador mínimo de error cuadrático medio (MMSE) logra minimizar el error cuadrático medio (MSE), que es una medida común de la calidad del estimador. La característica principal del ecualizador MMSE es que, por lo general, no elimina el ISI por completo, pero minimiza la potencia total del ruido y los componentes del ISI en la salida. [8]

El estimador Lineal MMSE para el sistema MIMO es:

$$\hat{X} = P_d (H H^H + \sigma_n^2 I)^{-1} H^H \quad (4)$$

Donde

H^H = Operador Hermitico del canal

H es canal del sistema

σ_n^2 es la potencia de ruido en el receptor,

P_d es la potencia de datos transmitida.

Para la Cancelación sucesiva de interferencia decodificando el símbolo:

$y_1 = x_1 + n$, empleado para decodificar x_1 ,

$y_2 = y - h_1 x_1$ (Eliminar el efecto de haber decodificado x_1)

$y_2 = (h_1 x_1 + h_2 x_2 + \dots + h_t x_t) + n - h_1 x_1$

$y_2 = h_2 x_2 + h_3 x_3 + \dots + h_t x_t + n$

Ahora se repite el proceso decodificando x_2 y así sucesivamente. [8]

4. Simulación

En la simulación realizada en Matlab se tiene un sistema MIMO Masivo para las modulaciones BPSK, 16 QAM, 64 QAM, en el cual se analiza el rendimiento del Bit Error Rate (BER) vs Signal to Noise Ratio (SNR), para los diferentes algoritmos de detección ZF Y MMSE, y sus versiones con cancelación sucesiva de interferencias ZF-SIC y MMSE-SIC.

El programa permite generar gráficas comparativas de los distintos algoritmos de detección permitiendo comparar su rendimiento en las distintas modulaciones aplicadas, tal como se explica en el diagrama de flujo en la figura 1.

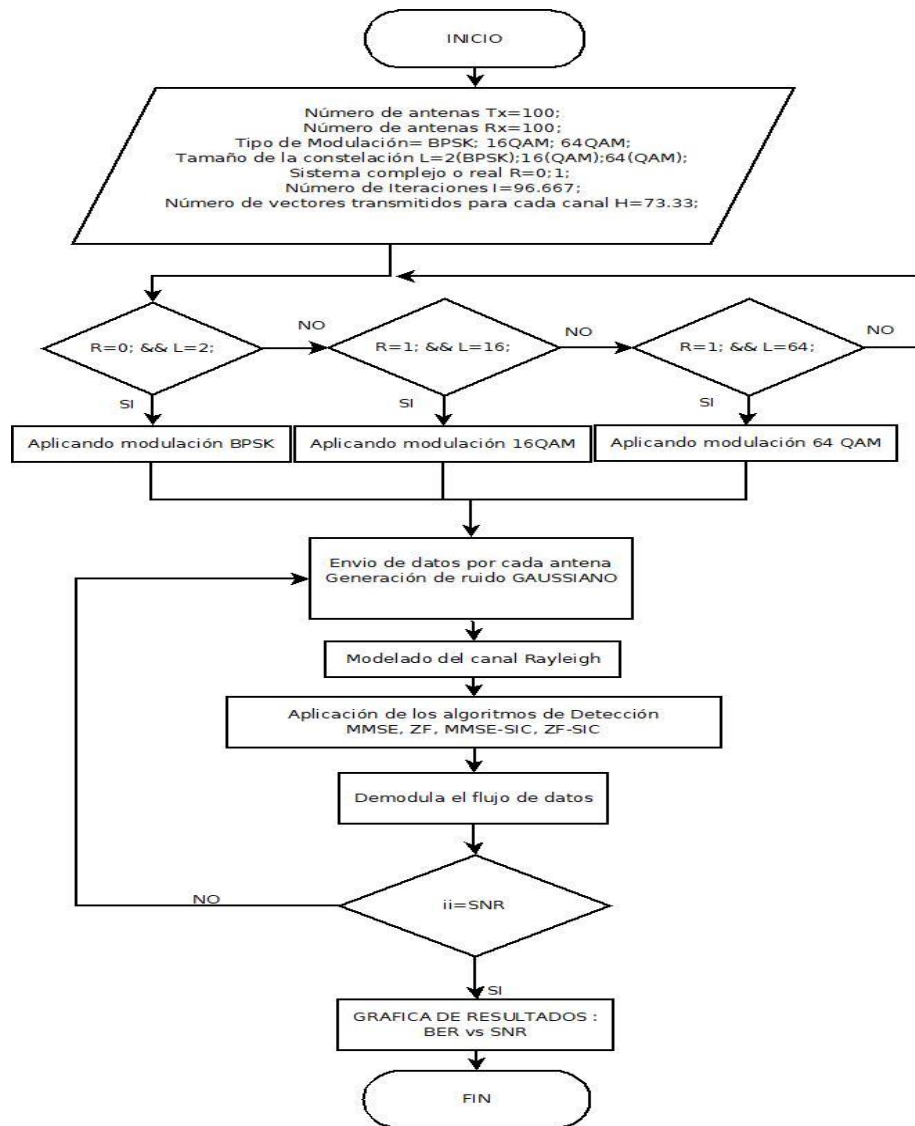


Figura 1. Diagrama de flujo de la simulación del sistema.

Se inicia definiendo las variables como la cantidad de antenas de transmisión y recepción, que para este caso son: 100 antenas de transmisión y 100 antenas de recepción, debido a que es un sistema MIMO Masivo, el cual requiere al menos 100 antenas en transmisión, y para los detectores ZF y ZF-SIC el valor de las antenas en transmisión tiene que ser mayor o igual que el número de antenas en recepción, al no cumplir con esta condición se obtienen matrices singulares. El número de iteraciones o simulaciones Montecarlo, que indica el número de canales distintos a simular y el

número de vectores transmitidos por canal, que sirven para mejorar la transmisión de símbolos o señales, van relacionados debido a que a mayor número de señales o símbolos a transmitir por canal, se necesita un mayor número de canales, en este caso el número de iteraciones Montecarlo es 96.667 en promedio y el número de vectores transmitidos por canal es 73.33 en promedio, estos valores varían dependiendo de la modulación que se esté aplicando, para este caso se tiene estos valores ya que se utiliza algoritmos de detección con Cancelación Sucesiva de Interferencias como son ZF-SIC Y MMSE-SIC, que están basados en

una decodificación de forma secuencial con ordenamiento óptimo, los cuales decodifican los símbolos que poseen menor varianza (símbolos más seguros). Por cada iteración se cancela el efecto del símbolo decodificado, y el proceso se repite. Esta variante ayuda a que estos algoritmos de detección tengan una probabilidad de error menor comparándolas con sus versiones estándar, aunque aumenta la complejidad de implementación, creando un equilibrio y obteniendo una mejor señal en transmisión y recepción, teniendo en cuenta que estos valores crean una mayor carga computacional. El tipo de constelación la cual puede ser real o compleja dependiendo del tipo de modulación con la que se está trabajando, y el tamaño de la constelación.

Después de escoger la modulación (BPSK, 16QAM, 64QAM) a usar se produce la generación y envío de datos a través de cada antena, así como la generación de ruido gaussiano. Para este caso se realiza la comparación de varios algoritmos de detección al mismo tiempo los valores de la señal transmitida de ruido aleatorio y el número de matrices por canal deben ser las mismas.

Con todos estos parámetros, las funciones aplican un algoritmo de detección determinado mediante el cual se obtiene una estimación de señal transmitida. Al comparar esta estimación con la señal real transmitida se obtiene el número de errores ($n_{errores}$) para cada SNR. Sabiendo que el tamaño de cada vector transmitido es igual a N (Número de antenas transmisoras), además que existe un número de canales diferentes ($n_{iteraciones}$) y que se transmite un número de vectores por cada canal ($n_{symbols}$), entonces el número total de símbolos que se va a decodificar es $N \cdot n_{iteraciones} \cdot n_{symbols}$, y la probabilidad de error (P_e) dada una SNR se calcula con la siguiente fórmula.

$$P_e = \frac{n_{errores}}{N \cdot n_{iteraciones} \cdot n_{symbols}} \quad (5)$$

En este caso, el número de símbolos a decodificar por cada modulación está dada por la siguiente fórmula:

$$\# \text{ símbolos} = N \cdot n_{iteraciones} \cdot n_{symbols} \quad (6)$$

Tabla 1. Número de símbolos a decodificar para cada modulación.

Modulación	# símbolos
BPSK	10^6
16QAM	5×10^5
64QAM	6.3×10^5

Se realizó una función para cada algoritmo de detección, los cuales son llamados desde el script principal, mediante el cual se ingresan los parámetros requeridos para la ejecución de los algoritmos.

Después se procede a la demodulación del flujo de datos recibidos de los algoritmos aplicados para su posterior comparación.

El proceso se repite hasta que se cumpla con el número de Iteraciones o simulaciones Montecarlo y número de vectores transmitidos por canal definidos en los parámetros iniciales, estos permiten llegar a los valores requeridos del BER 10^{-3} para redes inalámbricas.

5. Análisis de resultados

De los resultados obtenidos, se procede a la comparación de las señales, al aplicar los diferentes algoritmos de detección en gráficas del BER vs SNR y así observar la relación que existe entre los algoritmos y las mejoras que presentan en los parámetros de comparación.

La Figura 2 muestra la comparación de los detectores, ZF-SIC con el detector ZF y el detector MMSE-SIC con el detector MMSE, para una modulación BPSK, con un valor del BER= 10^{-3} bits.

Existe una mejora en el rendimiento de 37 dB con respecto a la relación señal a ruido (SNR) entre el detector ZF-SIC y el detector ZF, en lo que se refiere a los detectores MMSE-SIC y MMSE, existe una mejora en el rendimiento de 6 dB con respecto a la relación señal a ruido (SNR) por parte del detector MMSE-SIC, debido a que los detectores SIC poseen un banco de receptores lineales los cuales ayudan a tener una mejor recepción de las señales transmitidas. [9]

Además, existe una mejora de 12 dB con respecto a la relación señal a ruido (SNR) entre el detector

MMSE-SIC y el detector ZF-SIC, debido a que en MMSE se minimiza el error cuadrático el cual es una medida común de la calidad del estimador, una de las principales características del ecualizador MMSE es que minimiza la potencia total del ruido y los componentes del ISI a la salida. [7]

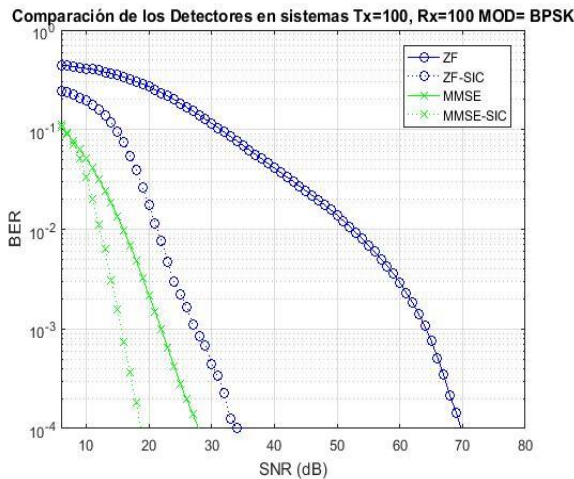


Figura 2. Comparación BER vs SNR del sistema MIMO Masivo para la modulación BPSK.

En la figura 3 se muestra la comparación de los detectores, ZF-SIC con el detector ZF y el detector MMSE-SIC con el detector MMSE, para una modulación 16 QAM con un valor del $BER=10^{-3}$ bits.

Existe una mejora en el rendimiento de 17 dB con respecto a la relación señal a ruido (SNR) entre el detector ZF-SIC y el detector ZF, además de una mejora en el rendimiento de 12 dB entre el detector MMSE-SIC y el detector MMSE.

Ya que los detectores SIC localizan los flujos de datos paralelos y realizan la cancelación sucesiva de las señales detectadas a partir de una señal recibida. [9]

También se tiene una mejora en el rendimiento de 8 dB entre el detector MMSE-SIC y el detector ZF-SIC, porque en MMSE se reduce su error cuadrático medio de la señal transmitida con la señal recibida, con el fin de reducir la interferencia entre usuarios y así tener una alta eficiencia. [10]

Así mismo, se notó que en la modulación de 16QAM se tiene un valor menor de SNR para el detector ZF-SIC en relación con el valor de SNR obtenido por el detector MMSE, a diferencia de lo que ocurre en la modulación BPSK en la cual se tiene un valor menor de SNR para el detector

MMSE en relación con el valor de SNR obtenido por el detector ZF-SIC, esto es debido a que en las modulaciones de amplitud por cuadratura (QAM) los flujos de datos se dividen en grupos de 4 bits y estos en subgrupos de 2 bits, entonces se codifica cada bit en cuatro estados o niveles de amplitud. Por lo tanto, el detector ZF-SIC presenta una mejora con la cancelación de interferencias sucesivas ya que detectan los flujos paralelos y realiza la cancelación sucesiva de los componentes de las señales detectadas a partir de la señal recibida. [11]

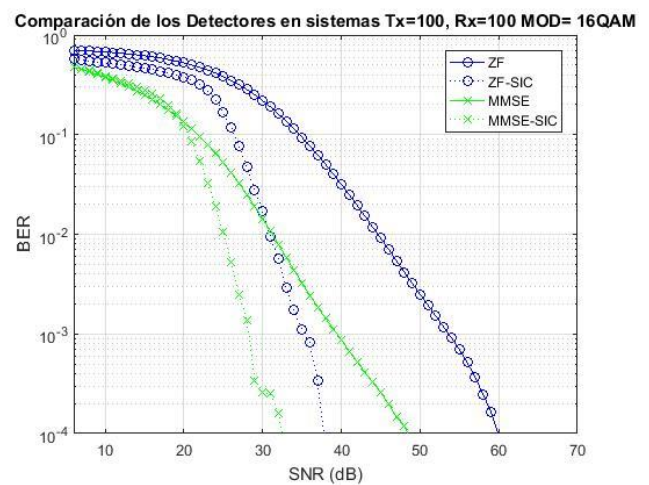


Figura 3. Comparación BER vs SNR del sistema MIMO Masivo para la modulación 16QAM.

En la figura 4 se muestra, una comparación de los detectores, ZF-SIC con el detector ZF y el detector MMSE-SIC con el detector MMSE, para una modulación 64QAM con un valor del $BER=10^{-3}$ bits.

Existe una mejora en el rendimiento de 18 dB con respecto a la relación señal a ruido (SNR) entre el detector ZF-SIC y el detector ZF, además de una mejora en el rendimiento de 14 dB entre el detector MMSE-SIC y el detector MMSE, en vista de que los detectores SIC disminuyen el número de señales interferentes, para tener una mejor comparación en cada técnica de detección, donde se tiene un BER para una SNR determinada. [12]

Así como tiene una mejora en el rendimiento de 1 dB con respecto a la relación señal a ruido (SNR) entre el detector MMSE-SIC y el detector ZF-SIC. En virtud de que el detector MMSE presenta valores menores para el BER que los presentados

por ZF en regímenes SNR de medio a alto, aunque necesita el conocimiento del SNR. [1]

Además, se notó que en la modulación de 64QAM se tiene un valor de SNR menor para el detector ZF-SIC en relación con el valor de SNR obtenido por el detector MMSE como ocurrió en la modulación 16QAM, esto se debe a las características que tienen las modulaciones de amplitud por cuadratura y ventajas de la cancelación de interferencias sucesivas.

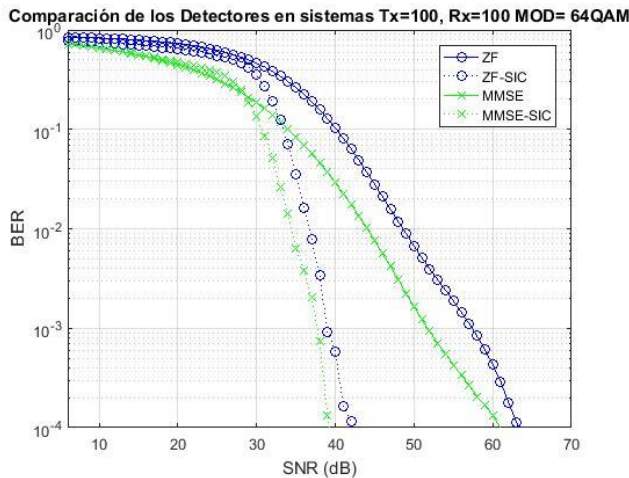


Figura 4. Comparación BER vs SNR del sistema MIMO Masivo para la modulación 64QAM.

En la figura 5 se muestra, la comparación del detector ZF-SIC en las modulaciones: BPSK, 16QAM y 64QAM con un valor del $BER=10^{-3}$ bits.

Existe una mejora en el rendimiento de 6 dB con respecto a la relación señal a ruido (SNR) para la modulación BPSK en comparación con la modulación 16QAM y una mejora en el rendimiento de 11 dB en comparación con la modulación 64QAM, puesto que en BPSK se tiene dos posiciones para cambiar de fase por lo cual es menos susceptible al ruido, en comparación con las modulaciones QAM [13]

Además, se tiene una mejora en el rendimiento de 5 dB con respecto a la relación señal a ruido (SNR) para la modulación 16QAM en comparación con la modulación 64QAM en vista de que aumenta el número de fases en la modulación 64QAM, que si bien es cierto permite el envío de mayor número de bits por símbolo, también resulta en una tasa de error de bit más alta que para las variantes de QAM de inferior orden. [14]

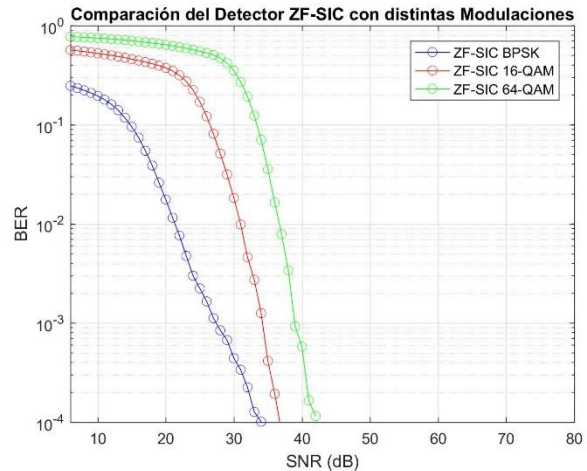


Figura 5. Comparación BER vs SNR del detector Zero Forcing con Cancelación de Interferencia Sucesiva en distintas modulaciones.

En la figura 6 se muestra, la comparación del detector MMSE-SIC en las modulaciones: BPSK, 16QAM y 64QAM con un valor del $BER=10^{-3}$ bits.

Existe una mejora en el rendimiento de 12 dB con respecto a la relación señal a ruido (SNR) para la modulación BPSK en comparación con la modulación 16QAM y una mejora en el rendimiento de 21 dB en comparación con la modulación 64QAM, dado que para las modulaciones QAM se cuenta con un cambio de fase y con un cambio de amplitud, por lo tanto se tiene más puntos de decisión y se puede enviar mayor número de bits, es decir que en las modulaciones QAM de orden superior los puntos deben estar más cerca y por lo tanto los hace más susceptibles al ruido y a la distorsión. [13]

También, se tiene una mejora en el rendimiento de 9 dB con respecto a la relación señal a ruido (SNR) para la modulación 16QAM en comparación con la modulación 64QAM debido a que se tiene un aumento en el número de fases y por las características de la modulación 64QAM.

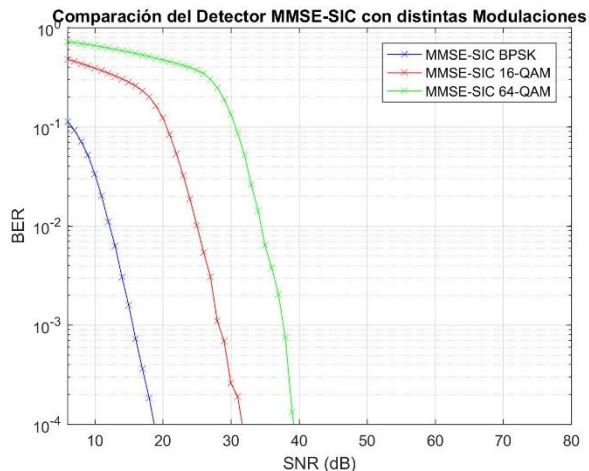


Figura 6. Comparación BER vs SNR del detector Mínimo de Error Cuadrático Medio con Cancelación de Interferencia Sucesiva en distintas modulaciones.

6. Conclusiones

Se encontró que los detectores con cancelación de interferencia sucesiva (ZF-SIC, MMSE-SIC) presentan una mejora en rendimiento en comparación de sus versiones estándar (ZF, MMSE), sin importar el tipo de modulación (BPSK, 16QAM, 64QAM) que se aplique, debido a las ventajas que ofrece SIC, las cuales se pudo evidenciar en las gráficas obtenidas en la simulación.

En cuanto a las modulaciones de amplitud por cuadratura utilizadas (16QAM, 64QAM), se tiene un aumento con respecto a la relación señal a ruido (SNR) para cada uno de los algoritmos de detección SIC utilizados en la modulación 64QAM en comparación con la modulación 16QAM, debido a las características que presentan las modulaciones de orden superior anteriormente mencionadas.

En la actualidad los sistemas de comunicaciones utilizan múltiples antenas en transmisión y recepción (5G), y constelaciones de alto orden que tienen como objetivo maximizar la eficiencia espectral pero a medida de que se aumente el número de antenas y el tamaño de la constelación es más difícil tener un receptor óptimo, los detectores MMSE-SIC y ZF-SIC muestran resultados muy favorables respecto de sus

versiones estándar sin tener un aumento considerable en su carga computacional.

Referencias

- [1] H. Cuevas, «Propuesta de aplicación de la tecnología MIMO Masivo a las comunicaciones móviles 5G,» p. 5, 2017.
- [2] I. Romero Ibáñez, «Ortogonalidad y capacidad en sistemas MIMO masivo,» *MS thesis*, p. 17, 2014.
- [3] I. Santos Velázquez, «Revisión de algoritmos de detección para sistemas MIMO de alto orden,» *Trabajo Fin de Máster en Electrónica, Tratamiento de Señal y Comunicaciones*, pp. 1-32, 2014.
- [4] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, & C. G. Kang, *Signal Detection for Spatially Multiplexed MIMO Systems*, 2010.
- [5] G. L. A. MÉNDEZ, P. E. J. GOMEZ, & V.A. TERRÉ, «APLICACIÓN DE UN ALGORITMO BASADO EN PROPAGACIÓN DE ESPERANZAS PARA DETECCIÓN DE SÍMBOLOS EN SISTEMAS L-MIMO,» *Revista GTI*, vol. 14, n° 39, pp. 75-85, 2015.
- [6] G. L. A. Méndez, P. E. Jojoa, & V. Almenar, *Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G Inalámbrica*, vol. 2, Entramado, 2015, p. 253.
- [7] N. S. Kumar, & K. S. Kumar, «Performance Analysis and Comparison of Zero-forcing SIC and MMSE SIC for MIMO Receivers using BPSK and 16-QAM Modulation methods.,» *IJCSET*, vol. 1, n° 8, p. 530, 2011.

- [8] H. Tekwani , M. Srivastava , «Analysis of MIMO system using MMSE-SIC, MMSE & ZF receiver with spatial multiplexing,» *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, vol. 2, p. 60, 2015.
- [9] F. Castillo, «Procesamiento de señales en sistemas de comunicaciones MIMO con modulación espacial,» *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California*, p. 16, 2015.
- [10] J. Asensio Muñoz , «Comparativa de técnicas de precodificación ZF y MMSE en un sistema celular cordinado,» *Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones*, p. 15, 2011.
- [11] G. J. Foschini, Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas, vol. 1, 1996, pp. 41-59.
- [12] G. Ávila, F. Tello Borja, «Simulación e implementación de un sistema de transmisión digital MIMO 4X4 con algoritmo V-BLAST usando los módulos USRP 2920,» Tesis de Pregrado, Univerdidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2018.
- [13] O. Ubierna , «comunicacionesinalambricashoy,» 9 agosto 2016. [En línea]. Available: <https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/wireless/conceptos-tecnicos-sobre-modulacion/>.
- [14] I. Pool , «FMUSER International Group INC,» 10 octubre 2015. [En línea]. Available: <http://es.fmuser.net/content/?1604.html>.